Check for updates

DOI: 10.1002/piuz.202001560

Globale Erwärmung einfach und physikalisch nachgerechnet

Sonne oder Treibhauseffekt?

Axel Kleidon



***Die globale Erwärmung zeigt sich deutlich am weltweiten Rückgang von Gletschern, wie hier im Nationalpark Jotunheimen in Norwegen** (Foto: A. Kleidon).*

Der globale Klimawandel nimmt Fahrt auf. Aber woher wissen wir eigentlich, dass er durch den Treibhauseffekt verursacht wird und nicht durch eine aktiver werdende Sonne? Einfache physikalische Überlegungen zeigen, warum sich Änderungen im Treibhauseffekt anders auf Erwärmungsmuster niederschlagen als Änderungen in der Solarstrahlung. Daran kann man den menschengemachten Klimawandel klar erkennen.

Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern hat die mittlere Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre seit der Industrialisierung über die letzten 150 Jahre um fast 50 % zugenommen und damit den atmosphärischen Treibhauseffekt verstärkt. Die daraus resultierende Erwärmung der Lufttemperatur spiegelt sich in vielen Beobachtungen wider. Neben den direkten meteorologischen Temperaturmessungen zeigt sich die Erwärmung auch im Eindringen des Erwärmungssignals in die obere Erdkruste, im Rückgang oder Verschwinden von Gletschern in Gebirgen und im Meereis, im Steigen des Meeresspiegels, überwiegend aufgrund der thermischen Expansion [1] und in der Zunahme von ozeanischen Hitzewellen [2].

Grundsätzlich entspricht eine Klimaänderung, also eine systematische Verschiebung des mittleren Zustands, einem recht kleinen Signal im Vergleich zu den natürlichen Schwankungen in der Temperatur, die während des Tages, im Wettergeschehen, oder über die Jahreszeiten beobachtet wird. Abbildung 1 zeigt dies oben beispielhaft anhand der in Jena beobachteten Tagesmitteltemperaturen [3]. Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung, also wie häufig eine bestimmte Tagesmitteltemperatur in zwei Zeiträumen gemessen wurde. Ein Zeitraum sind die vergangenen dreißig Jahre (1989–2018, in rot), der zweite ist die entsprechende Periode vor 100 Jahren (1889–1918, in blau). Die Klimaforschung wählt meist einen Zeitabschnitt von 30 Jahren, um einen mittleren Klimazustand zu definieren.

Diese Häufigkeitsverteilung zeigt die starke Variation während des typischen Jahresgangs, mit kalten Temperaturen von bis zu –10 und –20 °C im Winter und warmen Temperaturen bis 30 °C im Sommer. So spannt die Verteilung der Tagesmitteltemperaturen einen breiten Bereich von –10 °C bis 30 °C auf. Eine Erwärmung von 1–2 °C über

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

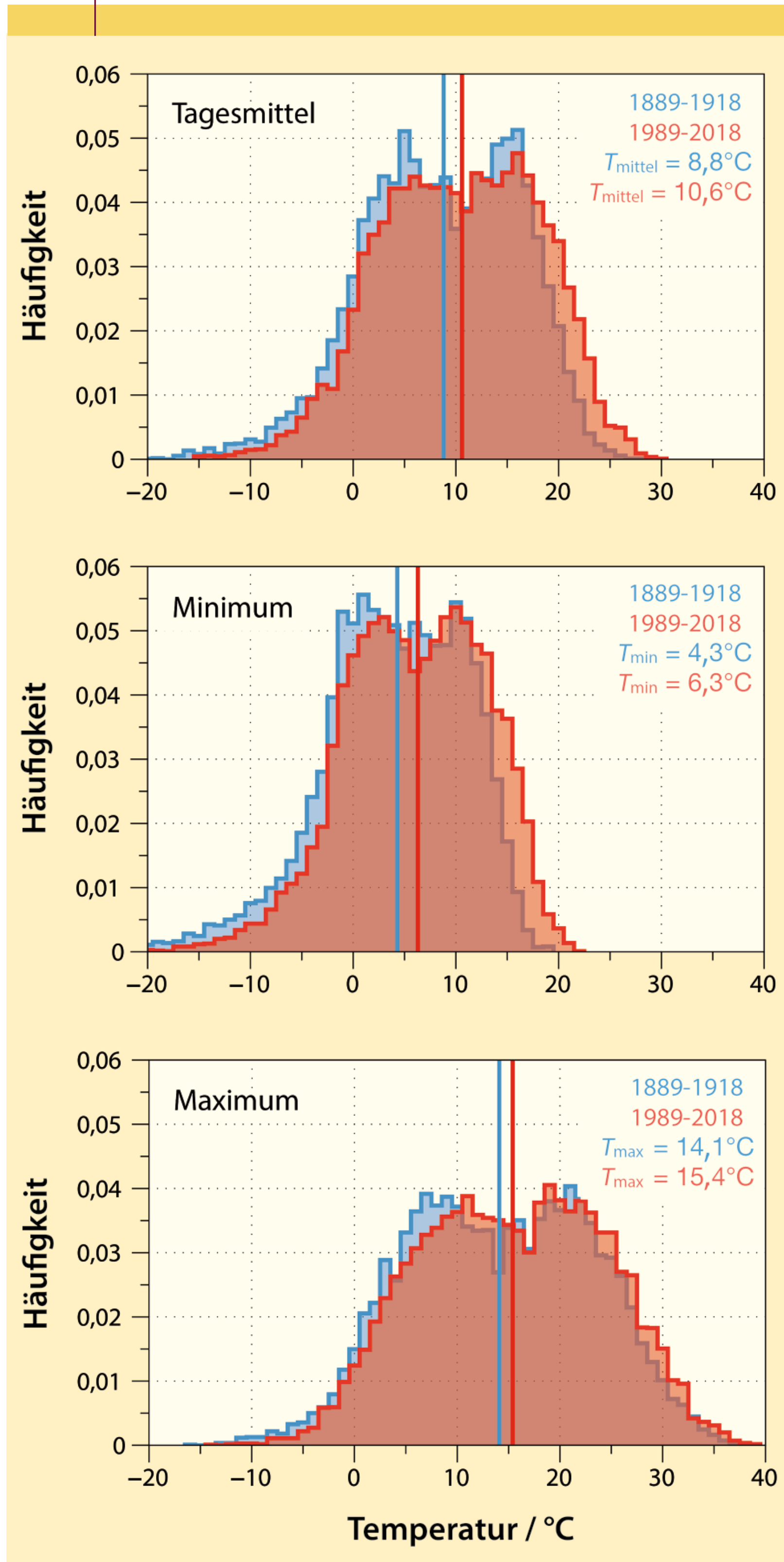
© 2020 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Online-Ausgabe unter: wileyonlinelibrary.com

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

ABB. 1 | GLOBALE ERWÄRMUNG



***Die Erwärmung des Klimazustandes, dargestellt als Häufigkeitsverteilungen von Temperaturmessungen des Tagesmittelwerts (oben), der Tagesminima (Mitte) und Tageshöchstwerte (unten) in Jena über die letzten dreißig Jahre (rot), zum Vergleich eine entsprechende Zeitspanne vor 100 Jahren (blau). Die vertikalen Linien zeigen die Mediane der jeweiligen Häufigkeitsverteilungen** (nach [3]).*

100 Jahre fällt dort nicht besonders stark auf. Allerdings können wir eine deutliche und systematische Verschiebung in der Häufigkeitsverteilung zu allgemein wärmeren Temperaturen sehen: Der Median der Temperaturverteilung in Jena hat sich über die letzten 100 Jahre um 1,8 °C von 8,8 °C auf 10,6 °C erhöht.

Man könnte ebenso andere Zeiträume oder Wetterstationen auswählen, um diesen Erwärmungstrend zu zeigen, er ist weit verbreitet. Aber woher wissen wir, dass diese Erwärmung durch den verstärkten Treibhauseffekt erzeugt wurde?

Diese Frage möchte ich im Folgenden mit Hilfe der Physik beantworten: Der Treibhauseffekt verändert die Lufttemperatur anders als hypothetische Änderungen in der Solarstrahlung, etwa durch eine verstärkte Aktivität der Sonne, und somit hinterlässt er charakteristische Spuren in Temperaturbeobachtungen.

Eine dieser charakteristischen Spuren des verstärkten Treibhauseffekts zeigt sich in einer stärkeren Erhöhung der Tagesminimumtemperaturen, die typischerweise in den frühen Morgenstunden erreicht werden. Abbildung 1 demonstriert dies anhand der Häufigkeitsverteilungen der minimalen und maximalen Tagestemperaturen von Jena über die zwei Vergleichszeiträume. Hier können wir erkennen, dass die Minimumtemperaturen mit 2,0 °C stärker zugenommen haben als die Tageshöchsttemperaturen, die lediglich um 1,3 °C gestiegen sind.

Es gibt noch weitere solcher charakteristischen Muster: So erwärmen sich durch den Treibhauseffekt die Polargebiete stärker als die Tropen, der Winter stärker als der Sommer und das Land mehr als der Ozean. In Szenarios von Klimamodellen setzen sich diese Erwärmungsmuster in der Regel fort. Diese Muster kann man eindeutig auf die Zunahme des Treibhauseffekts zurückführen – eine stärkere Erwärmung der Nacht kann wohl kaum auf eine Zunahme der Sonnenaktivität zurückgeführt werden.

Typischerweise werden für die Berechnung des Klimawandels hochkomplexe numerische Modelle der Atmosphäre benutzt, die Strahlungstransfer und Luftbewegung detailliert beschreiben und diese Effekte wiedergeben können. Diese charakteristischen Muster des verstärkten Treibhauseffekts lassen sich aber auch physikalisch recht einfach erklären, worauf ich hier eingehen möchte. Dabei liegt mein Fokus auf den unterschiedlichen Auswirkungen von Solarstrahlung und Treibhauseffekt auf die Temperatur im klimatologischen Mittel, wir betrachten hier also kein Wettergeschehen.

Während Solarstrahlung die Erdoberfläche erwärmt, beeinflusst der atmosphärische Treibhauseffekt, wie effektiv die Oberfläche sich abkühlen kann. So zeigt sich die Zunahme des Treibhauseffekts stärker zu Zeiten und in Regionen, in denen die Sonne eher spärlich wärmt wie in der Arktis oder komplett ausfällt wie in der Nacht. Durch diese unterschiedlichen Wirkungsweisen kann man die Signaturen des erhöhten Treibhauseffekts klar von Änderungen der Solarstrahlung unterscheiden. Im

© 2020 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Folgenden untermauere ich diese intuitive Erkenntnis mit Hilfe von einfachen physikalischen Überlegungen und schätze die Effekte mit Gleichungen quantitativ ab. Die Herleitungen sowie die Berechnungen stehen in Anhängen zur Verfügung, die online verfügbar sind (Details siehe „Zusatzmaterial“ unter „Literatur“), und basieren auf einfachen, thermodynamischen Ansätzen, um das Klimasystem zu verstehen [4–6]. Diese Abschätzungen sind konsistent mit den aus den Klimamodellen abgeleiteten Mustern, die man bei einem stärkeren Treibhauseffekt erwarten würde.

Was bestimmt die mittlere Temperatur?

Der Startpunkt für die Beschreibung der Temperatur ist die Energiebilanz. Diese Bilanz setzt die Energieflüsse, die erwärmen, in Beziehung zu den Energieflüssen, die abkühlen. Im Folgenden beschreiben wir eine solche Energiebilanz für die Erdoberfläche. Genau genommen beschreibt dies dann die Oberflächentemperatur und nicht die bodennahe Lufttemperatur, die routinemäßig an Wetterstationen gemessen wird, aber diesen kleinen Unterschied vernachlässigen wir hier.

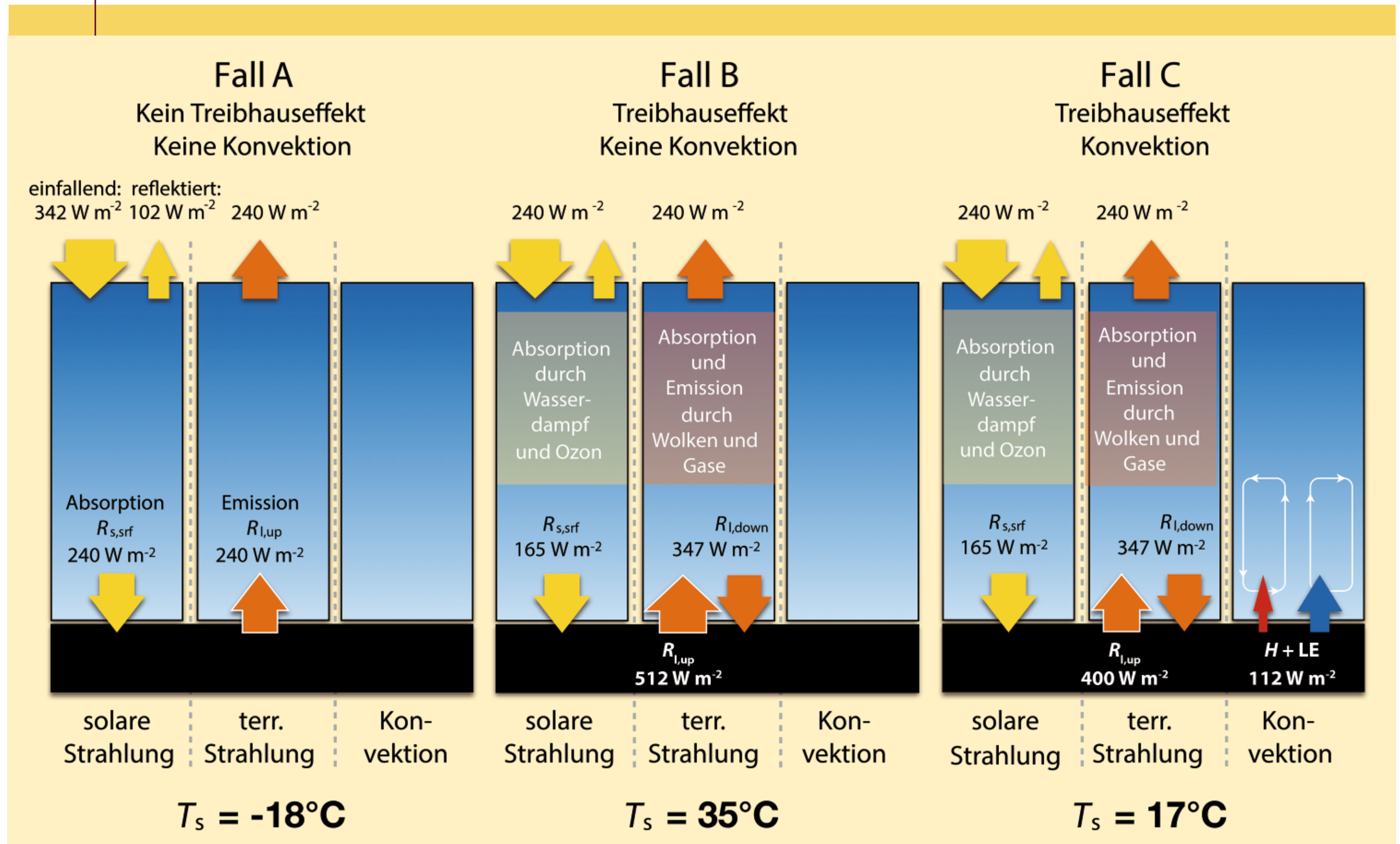
Wir bauen die Energiebilanz der Oberfläche als Nächstes stufenweise auf, um die Bedeutung der jeweiligen Terme zu erkennen (Abbildung 2). Ausgangspunkt ist die Erwärmung der Oberfläche durch Absorption von Solarstrahlung, global gemittelt sind es insgesamt etwa $R_{s,total} = 240$ W m^{-2} [7]. Im Gegenzug kühlt die Oberfläche durch die Emission von Strahlung ab. Dabei stellt sich ein Gleichgewicht ein, ansonsten würde sich die Erde immer weiter erwärmen. Setzen wir also die Erwärmung mit der Kühlung durch Emission gleich, wie im Fall A in Abbildung 2 dargestellt, so erhalten wir eine erste Formulierung der Energiebilanz:

$$\sigma T_s^4 = R_{s,total}, \qquad (1)$$

wobei wir hier für die Emission das Stefan-Boltzmann-Gesetz nutzen, mit der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4} und der Temperatur T_s. Gleichung (1) können wir nach T_s auflösen und erhalten eine Abschätzung der Oberflächentemperatur von –18 °C.

Das ist deutlich kühler als die beobachtete, global gemittelte Temperatur der Erdoberfläche von etwa 15 °C. Also fehlt offensichtlich noch ein wesentlicher Beitrag in

ABB. 2 | ENERGIEBILANZ



Drei Fälle der Energiebilanz, in denen verschiedene Terme ausgeschlossen oder berücksichtigt werden, und wie sich diese auf die Temperatur der Erdoberfläche auswirken. Zum Vergleich: Die global gemittelte Temperatur der Erde beträgt etwa 15 °C (vergleiche auch Tabelle 1). Die beiden gelben Pfeile am oberen Atmosphärenrand beschreiben den einfallenden und reflektierten Anteil des Sonnenlichts, wobei der Unterschied der im Erdsystem absorbierten Solarstrahlung entspricht. Unten, schwarz: Erdoberfläche.

© 2020 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

unserer Energiebilanz. Diesen Beitrag leistet die Atmosphäre, die wir in Fall A vernachlässigt haben. Sie absorbiert die von der Erdoberfläche emittierte Strahlung auf dem Weg ins Weltall und emittiert sie dann wieder. Bekanntlich entspricht Wärmestrahlung Wellenlängen im Infraroten. Moleküle mit einer ungleichen Ladungsverteilung wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan, aber auch Wolkentröpfchen, absorbieren in diesem Frequenzbereich die von der Oberfläche emittierte Strahlung. Danach emittieren sie diese Energie dann wieder, sowohl in Richtung Weltall als auch zurück zur Oberfläche. Der letztere Anteil heißt in der Meteorologie atmosphärische Gegenstrahlung und repräsentiert den Treibhauseffekt.

Wenn wir uns globale Abschätzungen [7] ansehen, dann trägt die atmosphärische Gegenstrahlung mit $R_{\mathrm{l,down}} = 347\ \mathrm{W\ m^{-2}}$ erheblich zur Erwärmung der Oberfläche bei (Abbildung 2, Fall B). Dies ist mehr als das Doppelte des an der Oberfläche absorbierten Anteils der Solarstrahlung von $R_{\mathrm{s,srf}} = 165\ \mathrm{W\ m^{-2}}$; die Differenz zu den im Fall A angesetzten $240\ \mathrm{W\ m^{-2}}$ wird in der Atmosphäre auf dem Weg zum Boden absorbiert, überwiegend durch Wasserdampf und Ozon. Das heißt, dass die emittierte Strahlung von der Erdoberfläche in der Regel mehrfach in der Atmosphäre absorbiert und wieder emittiert wird, bevor sie zurück ins Weltall gelangt. Mathematisch lässt sich die atmosphärische Gegenstrahlung als proportional zur gesamten absorbierten Solarstrahlung formulieren:

$$R_{\mathrm{l,down}} = \tau \cdot R_{\mathrm{s,total}},$$

wobei τ die optische Dicke der Atmosphäre darstellt und von der Konzentration an Treibhausgasen abhängt. Mit den angegebenen Zahlenwerten bestimmt sich der Wert von

$$\tau = \frac{R_{\mathrm{l,down}}}{R_{\mathrm{s,total}}} = \frac{347}{240} = 1{,}45.$$

Wir können die atmosphärische Gegenstrahlung als zusätzlichen Beitrag in unsere Energiebilanz (1) aufnehmen und erhalten so

$$\sigma T_{\mathrm{s}}^4 = R_{\mathrm{s,srf}} + R_{\mathrm{l,down}}. \tag{2}$$

Wenn wir hieraus die Temperatur berechnen, wie im Fall B in Abbildung 2, erhalten wir einen Wert von 35 °C.

Dies ist nun deutlich höher als die beobachteten 15 °C. Wir sind also noch nicht am Ziel in unserem Versuch, eine realitätsnahe mittlere globale Oberflächentemperatur zu errechnen. Was uns dazu noch fehlt, ist der Beitrag der Luftbewegung, der die Oberfläche in der Regel kühlt. Dieser Beitrag wird als turbulente Flüsse bezeichnet und beinhaltet zwei Komponenten. Zum einen wird Luft unten vom Boden erwärmt, steigt auf und transportiert so Wärme von der Oberfläche in die Atmosphäre. Dieser Anteil wird als fühlbarer Wärmefluss, H, bezeichnet. Zum anderen verdunstet die Oberfläche, und das Verdampfen von Wasser benötigt Wärme. Dies kühlt die Oberfläche – wie beim Schwitzen – und wird als latenter Wärmefluss, $L \cdot E$, bezeichnet; hierbei ist $L \approx 2{,}5 \cdot 10^6\ \mathrm{J\ kg^{-1}}$ die Verdampfungswärme und E die Verdunstungsrate in $\mathrm{kg\ m^{-2}\ s^{-1}}$. Diese Wärme wird in der Atmosphäre wieder freigesetzt, wenn Wasserdampf in Wolken kondensiert und ausregnet.

Unsere Formulierung der Energiebilanz nimmt damit folgende Form an:

$$\sigma T_{\mathrm{s}}^4 = R_{\mathrm{s,srf}} + R_{\mathrm{l,down}} - (H + LE). \tag{3}$$

Im globalen Mittel werden diese Beiträge auf $H = 24\ \mathrm{W\ m^{-2}}$ und $LE = 88\ \mathrm{W\ m^{-2}}$ geschätzt [7]. Damit erhalten wir eine Temperatur von 17 °C (Fall C in Abbildung 2), die somit recht nahe am beobachteten Wert liegt.

Wir sehen also, dass nicht nur die absorbierte Solarstrahlung, $R_{\mathrm{s,srf}}$, die Temperatur der Erdoberfläche bestimmt. Auch der atmosphärische Treibhauseffekt, dargestellt durch $R_{\mathrm{l,down}}$, wärmt zusätzlich, während die turbulenten Flüsse die Oberfläche kühlen, ausgedrückt durch das Minus vor $(H+LE)$. Hier sei noch bemerkt, dass die Wärme aus dem Erdinneren, der geothermische Wärmestrom, typischerweise mit weniger als $0{,}1\ \mathrm{W\ m^{-2}}$ an der Oberfläche ankommt. Er spielt damit praktisch keine Rolle für die Temperatur der Erdoberfläche.

Wir können nun Gleichung (3) nach der Oberflächentemperatur umformen und erhalten

$$T_{\mathrm{s}} = \left(\frac{R_{\mathrm{s,srf}} + R_{\mathrm{l,down}} - (H + LE)}{\sigma} \right)^{1/4}. \tag{4}$$

Anhand dieses Ausdrucks betrachten wir nun als Nächstes, warum Änderungen im Treibhauseffekt andere Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur haben als Veränderungen in der Solarstrahlung.

Klimatologische Temperaturänderungen

Die Temperatur der Erdoberfläche kann also ansteigen, wenn in Gleichung (4) entweder die solare Einstrahlung $R_{\mathrm{s,srf}}$ zunimmt – oder der Treibhauseffekt über τ in $R_{\mathrm{l,down}}$. Beobachten wir also eine Temperaturänderung, so können wir zunächst nicht entscheiden, ob dies durch die Sonne oder durch den Treibhauseffekt verursacht wurde.

Bei einer Zunahme an Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan steigt der Wert von τ. Die Atmosphäre wird damit weniger durchlässig für die terrestrische Ausstrahlung der Erdoberfläche, die Atmosphäre absorbiert mehr von dieser und emittiert sie wieder. Es bedarf dabei einer vergleichsweise kleinen Änderung von τ, um die Temperatur merklich zu erhöhen. So wird eine globale Erwärmung von $\Delta T_{\mathrm{s}} = 2\ \mathrm{K}$ durch ein $\Delta\tau = 0{,}09$ beschrieben, τ erhöht sich damit um etwa 6%. Dazu muss die atmosphärische Gegenstrahlung um etwa $\Delta R_{\mathrm{l,down}} = 22\ \mathrm{W\ m^{-2}}$ ansteigen.

Soll die Sonne eine Erwärmung von 2 K verursachen, dann bedarf es einer mittleren Änderung in der absorbierten Solarstrahlung von etwa $\Delta R_{\mathrm{s,total}} = 7\ \mathrm{W\ m^{-2}}$. Als Vergleich:

© 2020 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Im 11-jährigen Sonnenzyklus schwankt die Solarstrahlung in der Erdumlaufbahn um ± 1 W m^{-2}, was die mittlere Einstrahlung um lediglich ± 0,25 W m^{-2} verändert – der Faktor von 1/4 kommt aus der Mittelung dieser Strahlung über die Gesamtoberfläche der Erde. Somit kann der Sonnenzyklus praktisch zu keinen spürbaren Änderungen der globalen Mitteltemperatur führen.

Warum sich Polarregionen stärker erwärmen als Tropen

Wenn sich der Treibhauseffekt ändert, so hinterlässt er andere Spuren in Temperaturvariationen als bei Veränderungen der Solarstrahlung. Dies zeigt sich insbesondere in der unterschiedlichen Erwärmung von Tropen und Polarregionen, die man beobachtet, und die in Klimamodellen sehr deutlich zu sehen ist. Diese kann durch Rückwirkungen einer verringerten Schnee- und Eisbedeckung verstärkt werden – die wir hier nicht betrachten, da dieser Effekt nicht so stark ist, wie oft berichtet wird.

Die Ursache der unterschiedlichen Erwärmung von Tropen und Polarregionen kann man recht einfach anhand von Gleichung (4) nachvollziehen. Dazu leiten wir im Folgenden aus (4) Ausdrücke her, die beschreiben, wie sich die Temperatur entweder bei einer Veränderung der optischen Dicke der Atmosphäre verhält oder bei einer Änderung in der absorbierten Solarstrahlung. Mathematisch wird dies durch die Ableitungen dieser Größen beschrieben, also wie sich die Temperatur um dT_s ändert, wenn sich die optische Dicke um $d\tau$ oder die absorbierte Solarstrahlung um $dR_{s,total}$ verändert. Die erhaltenen Ausdrücke können wir dann nutzen, um die unterschiedliche Wirkungsweise zu deuten und die Effekte mit Zahlen zu veranschaulichen (Abbildung 3).

Der Einfluss des Treibhauseffekts auf die Oberflächentemperatur wird in Gleichung (4) durch deren Ableitung über die optischen Dicke der Atmosphäre τ bestimmt, also $dT_s/d\tau$. Der zentrale Term, der von der optischen Dicke abhängt, ist die atmosphärische Gegenstrahlung $R_{l,down}$. Sie wird maßgeblich von der absorbierten Solarstrahlung $R_{s,total}$ bestimmt, wird aber durch den atmosphärischen Wärmetransport J_a aus einer Region heraus oder in sie hinein verändert, mit

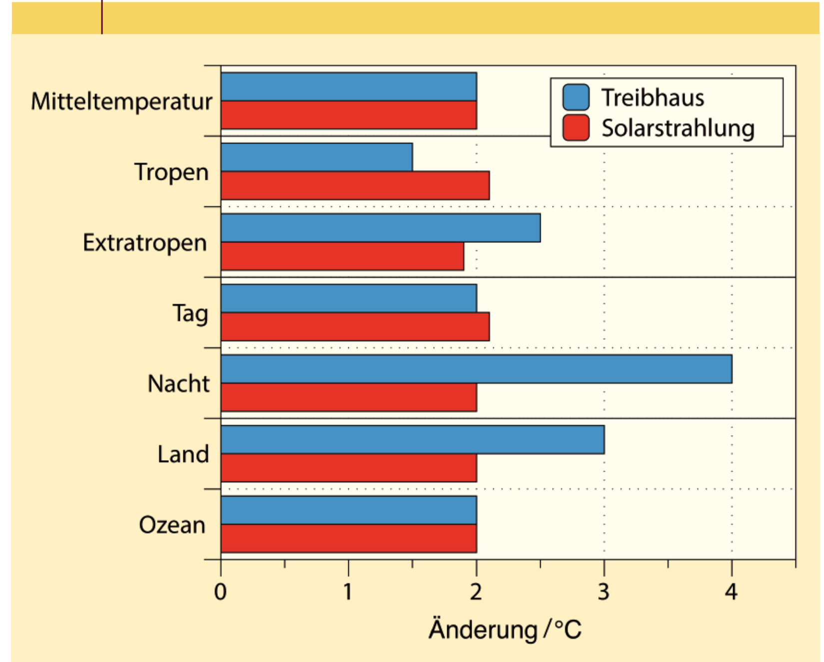
$$R_{l,down} = \tau\left(R_{s,total} \mp J_a\right).$$

Damit erhalten wir den folgenden Ausdruck (Gleichung (A8) im Zusatzmaterial):

$$\frac{dT_s}{d\tau} = \frac{1}{4\sigma T_s^3} \cdot \left(R_{s,total} \mp J_a - \frac{d(H+LE)}{d\tau}\right). \quad (5)$$

Der Einfluss des Treibhauseffekts wird damit von vier Größen bestimmt. Zum einen gibt es einen Vorfaktor $1/\left(4\sigma T_s^3\right)$, der aus der Ableitung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes herrührt. Dieser Faktor erweist sich als wichtig, da er für wärmere Regionen in Äquatornähe wegen der stärkeren Solarstrahlung kleiner ist als für kältere Polarregionen und erstere somit weniger empfindlich auf eine Änderung der optischen Dicke reagieren [8]. Die absorbierte Solarstrahlung $R_{s,total}$ wirkt sich – wenig überraschend – proportional auf die Temperaturveränderung aus, da die atmosphärische Gegenstrahlung direkt von dieser Größe abhängt. Allerdings wird diese Abhängigkeit vom Wärmetransport J_a verändert, sodass warme Regionen, aus denen die Wärme durch Luftströmungen in kältere Regionen exportiert wird, weniger empfindlich reagieren als kalte Regionen, in die diese Wärme hineinfließt. Die letzte Größe in Gleichung (5) drückt die Abhängigkeit der turbulenten Wärmeflüsse von der optischen Dicke aus. Diese kann man über einen thermodynamischen Ansatz beschreiben (Gleichungen (A5) und (A6) im Zusatzmaterial).

ABB. 3 | TREIBHAUSEFFEKT ODER SOLARSTRAHLUNG



Änderungen des Treibhauseffekts (blau) und der Solarstrahlung (rot) können beide zur gleichen Erwärmung der globalen Mitteltemperatur um 2 °C führen, zeigen aber unterschiedliche Effekte auf räumliche und zeitliche Temperaturmuster.

Bei einer globalen Erwärmung von 2 K durch den Treibhauseffekt führt dies zu einer ungleichen Erwärmung der Breitenkreise. Dazu teilen wir die Erde der Einfachheit halber in zwei Regionen auf, einen tropischen Teil bis hinauf zum dreißigsten Breitengrad und einen extratropischen oder polaren Teil für den Rest der Erdoberfläche. Aus Gleichung (5) erhalten wir damit eine Erwärmung der Tropen von lediglich 1,5 K, während sich die Extratropen deutlich stärker mit 2,5 K aufheizen. Der Hauptgrund für diese Differenz liegt in der unterschiedlichen Temperatur der beiden Regionen, die wie schon gesagt den Vorfaktor in Gleichung (5) unterschiedlich stark beeinflusst. Der Wärmetransport trägt ebenfalls bei, indem er die Erwärmung der Tropen um etwa 0,2 K reduziert und um den gleichen Beitrag in den Extratropen erhöht.

© 2020 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Nun schauen wir uns die Alternative mit einer veränderten Solarstrahlung an. Die Abhängigkeit der Temperatur von Änderungen in der Solarstrahlung erhalten wir, indem wir nun Gleichung (4) nach der Solarstrahlung ableiten (Gleichung (A11) im Zusatzmaterial):

$$\frac{\mathrm{d}T_s}{\mathrm{d}R_{s,\mathrm{total}}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{T_s}{R_{s,\mathrm{total}}}. \qquad (6)$$

Es fällt auf, dass dieser Ausdruck einfacher ist als die Abhängigkeit vom Treibhauseffekt. Dies liegt darin begründet, dass letztendlich alle Terme der Energiebilanz von der Solarstrahlung abhängen. Gleichung (6) kann leicht umgestellt werden und sagt dann aus, dass die prozentuale Änderung der absoluten Temperatur (in Einheiten von Kelvin) direkt durch die prozentuale Änderung der Solarstrahlung gegeben ist:

$$\frac{\mathrm{d}T_s}{T_s} \propto \frac{\mathrm{d}R_{s,\mathrm{total}}}{R_{s,\mathrm{total}}}.$$

Eine Zunahme von $R_{s,\mathrm{total}}$ von 7 W m^{-2} entspricht einer Änderung von 2,8 %, die Zunahme der Temperatur ist dann nach Gleichung (6) (2,8/4) % = 0,7 %. Bei einer mittleren Temperatur von 288 K entspricht dies den 2 K Erwärmung, die wir hier als exemplarischen Fall betrachten. Da sich aber die Temperaturen der Tropen und der Polarregionen auf der absoluten Temperaturskala vergleichsweise wenig unterscheiden, erwärmen sich beide Regionen ähnlich stark. Wenn wir die Erde wieder in zwei Regionen aufteilen und dies jeweils berechnen, so führt dies zu einer leicht stärkeren Erwärmung der Tropen von 2,1 K und einer leicht verringerten Erwärmung der Extratropen von 1,9 K.

Eine Änderung der Solarstrahlung führt also zu ganz anderen regionalen Erwärmungsmustern als eine Änderung des Treibhauseffekts. Dass es gerade in kälteren Regionen zu einer stärkeren Erwärmung bei Zunahme des Treibhauseffekts kommt, scheint zunächst nicht intuitiv. Dieser Effekt liegt hauptsächlich im Stefan-Boltzmann-Gesetz begründet. Bei kälteren Regionen bedarf es einer größeren Temperaturzunahme als in wärmeren Regionen, um die Emission um eine gegebene Rate zu erhöhen, weil die Steigung der Emission nicht so stark ist. Der Wärmetransport aus den Tropen verstärkt dieses ungleiche Erwärmungsmuster.

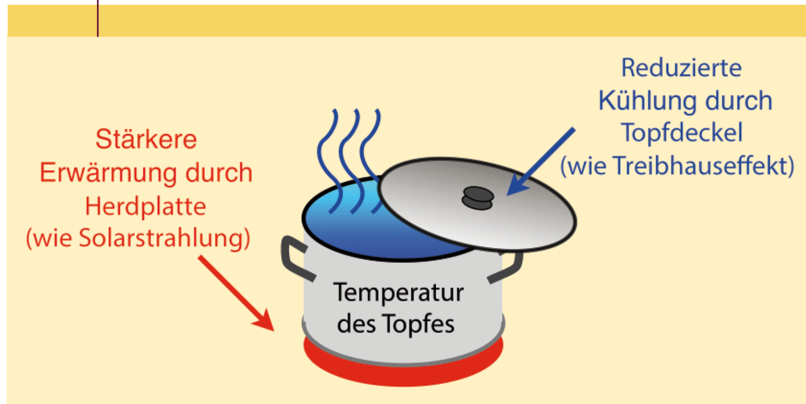
Um es auf den Punkt zu bringen ist es hilfreich, sich die Temperatur als Resultat von Erwärmungs- und Abkühlungsraten anschaulich vorzustellen. Hier hilft das Bild eines Kochtopfs auf einem Herd (Abbildung 4), der durch die Herdplatte erwärmt wird und dessen Kühlung über einen Topfdeckel regulierbar ist. So hat man zwei Größen, welche die Temperatur im Topf beeinflussen. Besonders wenn die Herdplatte nicht mehr heizt, steuert der Deckel wesentlich, wie schnell sich der Topf auskühlt. Für die Erde spielt die Absorption von Solarstrahlung am Boden die Rolle der Herdplatte, während der Treibhauseffekt die Rolle des Deckels repräsentiert. In Regionen, die weniger Sonnenlicht erhalten, hat dieser „Deckel" den größten Einfluss auf das Abkühlen der Temperaturen. So erwärmen sich die hohen Breiten und die Winter stärker durch einen erhöhten Treibhauseffekt als die Tropen und die Sommertemperaturen in den höheren Breiten.

Warum sich Nächte stärker als Tage erwärmen

Ein weiteres markantes Muster, bei dem sich Temperaturen stark ändern, ist der Tagesgang der Temperatur über Land. Während des Tages steigt die Temperatur wegen der absorbierten Solarstrahlung bis in die Nachmittagsstunden, während sie über die Nacht durch Emission von Strahlung sinkt und am frühen Morgen ihr Minimum erreicht. Dieser Tagesgang ist charakteristisch für Land, während sich die Temperatur der Meeresoberfläche in diesem Zeitraum praktisch nicht ändert. Dieses unterschiedliche Verhalten des Ozeans liegt daran, dass das Sonnenlicht in die oberen 20 m des Ozeans eindringt und dort absorbiert wird. So wird der Tagesgang unterhalb der Meeresoberfläche wegpuffert. Über Land dringt das Sonnenlicht nicht in den Boden ein, sondern wird an der Oberfläche absorbiert. Die Variation der Solarstrahlung wird so hauptsächlich durch die Erwärmung der unteren Atmosphäre ausgeglichen, führt zur Ausbildung einer konvektiven Grenzschicht und verursacht so den charakteristischen Tagesgang der Temperatur über Land [6].

Der Unterschied in den optischen Eigenschaften von Wasser und Boden prägen so eine unterschiedliche, zeitliche Dynamik der Energiebilanz und damit der Temperatur. Während die Kühlungsterme über Wasser wenig mit dem Tagesgang der Solarstrahlung variieren, folgen die turbulenten Flüsse über Land der solaren Einstrahlung. Nachts sind sie praktisch nicht vorhanden und kühlen folglich auch nicht. Während der Nacht fällt ihr Beitrag aus der Energiebilanz, also $H + LE$ in Gleichung (5), heraus. Das führt dazu, dass die Nachttemperaturen stärker auf Änderungen der

ABB. 4 | KOCHTOPF-ANALOGIE



Die Temperatur in einem Kochtopf als Analogie zur Temperatur der Erdoberfläche. Beeinflusst wird sie einerseits durch die Herdplatte, was der Absorption von Solarstrahlung entspricht, andererseits durch einen Topfdeckel, der den Treibhauseffekt repräsentiert. Beide haben jedoch einen unterschiedlichen Einfluss auf die Temperatur im Topf.

© 2020 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

optischen Dicke reagieren als Tagestemperaturen. Dies ist vergleichbar mit dem Unterschied zwischen Fall B und C in Abbildung 2: Ohne turbulente Flüsse schlägt sich die optische Dicke der Atmosphäre stärker auf die Temperatur der Erdoberfläche durch. Bei einer globalen mittleren Erwärmung von 2 K führt dies über Land zu einer doppelt so starken Erwärmung von 4 K in der Nacht, sodass die mittlere Erwärmung über Land nicht bei 2 K, sondern bei 3 K liegt. Dieser Unterschied zwischen Tag und Nacht kann dann auch erklären, warum sich Land stärker erwärmt als der Ozean.

Schauen wir uns wieder die alternative Annahme an, nämlich dass die solare Einstrahlung sich ändert. Das wirkt sich direkt auf die Tagestemperaturen aus. Auch die Nachttemperaturen ändern sich, da ja die atmosphärische Gegenstrahlung von der mittleren solaren Einstrahlung abhängt. Dies führt dann dazu, dass bei erhöhter Einstrahlung die Nachttemperaturen im ähnlichen Maße steigen wie die Tagestemperaturen. Mit anderen Worten: Eine Änderung in der Solarstrahlung führt zu anderen Änderungen im Tagesgang der Temperatur als der Treibhauseffekt.

Auch hier können wir wieder den Vergleich zum Kochtopf ziehen, um die unterschiedlichen Wirkungsweisen von Solarstrahlung und Treibhauseffekt zu veranschaulichen. Wenn wir den Topf auf der Herdplatte stärker heizen, so steigt die Temperatur währenddessen, und sobald wir die Heizung ausstellen kühlt sich der Topf von einer höheren Temperatur aus ab. Wenn wir aber nur den Deckel auflegen, so wärmt dies zwar auch während des Heizens, aber der Effekt des Deckels ist vergleichsweise stärker, sobald der Topf abkühlt. Genau dies geschieht mit den Nachttemperaturen beim Treibhauseffekt.

Schlussfolgerung

Diese Ausführungen sind natürlich sehr vereinfacht und vernachlässigen viele Prozesse. Dazu zählen Wolkenbildung, Änderungen des Niederschlags und der Schneebedeckung oder die Erwärmung von Städten, die durch den menschlichen Energieverbrauch verursacht werden.

Wenn wir aber die wesentlichen Terme in der Energiebilanz wie hier demonstriert betrachten, zeigt sich klar und deutlich, dass es nicht allein die Sonne ist, die die Temperatur der Erdoberfläche bestimmt. Der atmosphärische Treibhauseffekt spielt eine wesentliche Rolle, die Erdoberfläche auf eine für das Leben notwendige Temperatur zu erwärmen. Zudem beeinflussen auch die Luftbewegungen der Atmosphäre die Temperatur an der Erdoberfläche. Damit können wir die Wirkungsweise des Treibhauseffekts physikalisch nachvollziehen, relativ einfach abschätzen und deutlich von den Effekten der Sonne unterscheiden.

Zusammenfassung

Die Verbrennung von fossilen Energieträgern hat den atmosphärischen Treibhauseffekt verstärkt, was zur Erderwärmung führt. Doch woher wissen wir, dass der Treibhauseffekt einen so entscheidenden Einfluss auf das Klima hat? Alternativ könnte auch eine ansteigende Sonnenaktivität hinter der Erwärmung stecken. Doch ein erhöhter Treibhauseffekt wirkt sich anders auf das Erdklima aus als eine verstärkte Sonneneinstrahlung. Charakteristisch für den Treibhauseffekt ist zum Beispiel, dass sich die kälteren Regionen in Richtung der Pole stärker erwärmen, obwohl sie geringerer Solarstrahlung ausgesetzt sind. Warum das so ist, lässt sich mit einer relativ einfachen Energiebilanz zeigen, die wesentlichen Terme der Erwärmung und Kühlung berücksichtigt. Dieser Artikel stellt diesen Ansatz vor und demonstriert damit, dass die Oberflächentemperatur wesentlich vom Treibhauseffekt bestimmt wird.

Stichwörter

Klimawandel, globale Erwärmung, mittlere Temperatur, Solarstrahlung, Treibhauseffekt, Stefan-Boltzmann-Gesetz, atmosphärische Gegenstrahlung, Turbulenz, Tropen, Extratropen, Polarregionen, Kochtopf-Deckel-Analogon.

Literatur

[1] J. Asmus, Physik in unserer Zeit **2013**, *44*(6), 280.
[2] T. Frölicher, Physik in unserer Zeit **2019**, *50*(2), 64.
[3] M. Heimann, https://www.bgc-jena.mpg.de/~martin.heimann/weather/weather_temperature
[4] A. Kleidon, Physik in unserer Zeit **2012**, *43*(3), 136.
[5] A. Kleidon, M. Renner, Physik in unserer Zeit **2015**, *46*(1), 27.
[6] A. Kleidon, M. Renner, Earth Syst. Dynam. **2017**, *8*, 849.
[7] G. L. Stephens et al., Nature Geosci. **2012**, *5*, 691.
[8] F. Pithan, T. Mauritsen, Nature Geosci. **2013**, *7*, 181.

Zusatzmaterial

Der Zusatztext „Globale Erwärmung einfach und physikalisch nachgerechnet: Herleitungen“ enthält auch eine Excel-Datei mit den hier verwendeten Formeln. Man kann also ausprobieren, was etwa eine Änderung der atmosphärischen Gegenstrahlung (Treibhauseffekt) für Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur hat. Den Text finden Sie auf https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202001560/suppinfo (Kurzlink https://t1p.de/Kleidon) unter „Supporting Information“.

Zusatzmaterial



Der Autor



Axel Kleidon studierte Physik und Meteorologie an der Universität Hamburg und der Purdue University, Indiana, USA. Am Max-Planck-Institut für Meteorologie promovierte er 1998 über den Einfluss von tief wurzelnder Vegetation auf das Klimasystem. Danach forschte er an der Stanford University in Kalifornien und an der University of Maryland. Seit 2006 leitet er die unabhängige Forschungsgruppe „Theorie und Modellierung der Biosphäre“ am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena. Seine Forschungsinteressen reichen von der Thermodynamik des Erdsystems bis zu den natürlichen Grenzen erneuerbarer Energiequellen. (Foto: R. Wernicke)

Anschrift

Dr. Axel Kleidon, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Postfach 10 01 64, 07701 Jena.
axel.kleidon@bgc-jena.mpg.de

© 2020 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA